



УДК 621.891:621.316

Филоненко С.Ф., Косицкая Т.Н., Нимченко Т.В.

Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев

## ЭНЕРГИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В работе рассмотрены результаты моделирования энергии акустического излучения при трении и износе поверхностей из композиционного материала. Показано, что на стадии нормального износа не наблюдается приращения энергетических параметров результирующего сигнала акустической эмиссии. Определено, что с переходом на стадию, которая предшествует стадии катастрофического износа, происходит возрастание энергетических параметров акустического излучения. Показано, что наибольший прирост наблюдается в дисперсии энергии среднего уровня результирующего сигнала акустической эмиссии.*

Ключевые слова: энергия акустической эмиссии; композиционный материал; акустическое излучение; пара трения.

### Постановка проблемы

Диагностики узлов трения из композиционных материалов (КМ), как и для материалов с традиционной структурой, предполагает разработку методов, которые позволяют обнаруживать ранние стадии зарождения процессов, ведущих к катастрофическому износу (разрушению). Для КМ данная проблема усугубляется тем, что многие КМ склонны к хрупкому разрушению, что обусловлено спецификой их строения, и, как следствие, спецификой разрушения. Возникновение первых очагов разрушения может приводить к развитию необратимого лавинообразного процесса, протекание которого происходит с высокими скоростями. Поэтому задача обнаружения стадий трения, предшествующих возникновению катастрофического износа является актуальной.

При исследовании узлов трения из КМ, в большинстве случаев, применяются традиционные методы, которые позволяют определять коэффициент трения, момент трения, силу трения и другие характеристики. Однако, как показывают результаты исследований, данные методы чувствительны к макропроцессам, развивающимся в поверхностных слоях материалов узлов трения. Как правило, регистрируемые параметры фиксируют этапы не возникновения, а уже развития критических процессов. Это затрудняет их использование для разработки методов контроля и диагностики узлов трения.

Одним из наиболее чувствительных методов, применяемых при исследовании процессов трения и износа материалов с традиционной структурой и

КМ, является метод акустической эмиссии (АЭ). Его применение, как показывают результаты исследований, фиксирует кинетику процессов, развивающихся в поверхностных слоях материалов при работе узлов трения. Изменение механизмов изнашивания и уровней разрушения поверхностных слоев приводит к видоизменению акустического излучения и его параметров. При этом высокая чувствительность метода к развивающимся процессам позволяет получать значительные объемы информации. Интерпретация регистрируемой информации и идентификация процессов, которые развиваются при износе поверхностных слоев материалов, является основой в разработке методов контроля и диагностики узлов трения. С данной точки зрения, интерес представляют теоретические исследования процессов акустического излучения на всех стадиях трения и износа с учетом влияния различных факторов. Такие исследования предполагают получение закономерностей изменения параметров АЭ на стадии стабильного износа, а так же при переходе к стадии катастрофического износа с фиксацией начальных этапов ее зарождения. Одним из параметров АЭ является энергия акустического излучения. Исследование закономерностей ее изменения на всех стадиях износа, с учетом изменения условий трения, представляется важной проблемой в диагностике узлов трения из КМ.

### Анализ последних исследований и публикаций

Экспериментальные и теоретические исследования АЭ при трении поверхностей из материалов с

традиционной структурой и КМ рассмотрены в ряде работ [1–9]. В экспериментальных исследованиях анализ регистрируемого акустического излучения, как правило, носит описательный характер с констатацией факта его изменения на отдельных стадиях трения и износа. Получение общих закономерностей акустического излучения с математическим их описанием, как отмечается авторами экспериментальных работ, представляет значительные трудности.

Модели результирующих сигналов при трении и износе поверхностей материалов с традиционной структурой и КМ рассмотрены в работах [6–9]. Для материалов с традиционной структурой модель результирующего сигнала АЭ строилась на основе импульсных сигналов АЭ, формируемых при разрушении вторичных структур I и II типа. Для КМ модель результирующего сигнала строилась на концепции FBM, когда разрушение КМ рассматривается как процесс последовательного разрушения его элементов. Модели строились с учетом кинетики самого процесса разрушения, скорость которого возрастает во времени. В обоих случаях результирующий сигнал АЭ представляется в виде

$$U_p(t) = \sum_j U_j(t - t_j), \quad (1)$$

где  $j$  – порядковый номер площадки контактного взаимодействия ( $j = 1, 2, 3, \dots, m$ );  $U_j(t_j)$  –  $j$ -ый импульсный сигнал АЭ, который формируется на  $j$ -ой площадке контактного взаимодействия;  $t_j$  – момент времени появления  $j$ -го сигнала АЭ;  $m$  – общее количество импульсных сигналов АЭ, которые формируются на заданном времени работы узла трения.

В соответствии с моделью (1), в работах [7–10] рассмотрены результаты моделирования результирующего сигнала АЭ при трении поверхностей из КМ. При этом проведен анализ изменения параметров акустического излучения при изменении внешней нагрузки на пару трения, скорости ее вращения, физико-механических характеристик КМ и размеров его элементов. Исследования позволили получить основные закономерности изменения АЭ, а так же провести анализ процентного приращения параметров акустического излучения при изменении значений влияющих факторов. Данные факторы определены при описании импульсного сигнала АЭ, формируемого в условиях разрушения КМ заданного размера поперечной силой [11].

$$U(t) = U_0 v_0 [\alpha t (1 - \alpha t) (1 - g \sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0 (1 - \alpha t_0) (1 - g \sqrt{\alpha t_0})] \times e^{r[\alpha t (1 - \alpha t) (1 - g \sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0 (1 - \alpha t_0) (1 - g \sqrt{\alpha t_0})]} \times e^{-v_0 \int_{t_0}^t r[\alpha t (1 - \alpha t) (1 - g \sqrt{\alpha t}) - \alpha t_0 (1 - \alpha t_0) (1 - g \sqrt{\alpha t_0})] dt}, \quad (2)$$

где  $U_0 = N_0 \beta \delta_s$  – максимальное смещение, которое возникает при мгновенном разрушении всех элементов КМ;  $N_0$  – количество элементов КМ до начала разрушения;  $\beta$  – коэффициент пропорциональности;  $\delta_s$  – параметр, числовое значение которого определяется формой одиночного импульса возмущения при разрушении одного элемента КМ;  $\alpha$  – скорость нагружения элементов КМ;  $t, t_0$  – соответственно, текущее время и время начала разрушения элементов КМ;  $g$  – коэффициент, который определяется геометрическими размерами элементов КМ (его длиной и площадью поперечного сечения);  $r, v_0$  – коэффициенты, которые зависят от физико-механических характеристик КМ.

В условиях трения, при формировании результирующего сигнала АЭ, согласно (1), импульсный сигнал АЭ, согласно (2), формируется на площадке контактного взаимодействия, состоящей из  $N_0$  элементов КМ.

В работах [7–10] моделирование результирующих сигналов АЭ проводилось на стадии нормального изнашивания, т.е. при условии протекания процесса стабильного износа поверхностей трения из КМ. При этом считалось, что область контактного взаимодействия представляет собой некоторую малую площадку в площади перекрытия поверхностей узла трения, в пределах которой происходит разрушение элементов КМ. Также считалось, что в процессе работы узла трения площадка контактного взаимодействия изменяет свое положение во времени, а время появления каждого последующего импульсного сигнала АЭ, согласно (1), описывается выражением вида

$$t_j = j \Delta t_j \pm \delta, \quad (3)$$

где  $\Delta t_j$  – интервал часу появлением предыдущего и последующего импульсных сигналов АЭ;  $\delta$  – случайная составляющая времени появления импульсных сигналов АЭ, которая обусловлена не стабильностью физико-механических характеристик КМ, скорости вращения узла трения и влияния других факторов.

Однако при диагностике узлов трения из КМ необходимо определение начальных этапов зарождения процессов, ведущих к катастрофическому износу, т.е. этапов, которые предшествуют переходу к стадии катастрофического износа. С данной точки зрения, важной задачей является моделирование результирующих сигналов АЭ не только на стадии нормального изнашивания, но и на стадиях зарождения и развития катастрофического износа. Такие исследования позволят не только получить закономерности акустического излучения, но и установить основные его информативные параметры.



### Задачи исследования

В работе будет проведено моделирование акустического излучения на стадиях нормального и катастрофического износа поверхностей трения из КМ. Будут определены его энергетические характеристики на выборках заданного размера. Будут показаны закономерности изменения энергетических характеристик результирующего сигнала АЭ на стадии нормального и стадии катастрофического износа. Так же будет проведен анализ АЭ на переходной стадии или начальной стадии катастрофического износа. Будут рассмотрены закономерности изменения процентного прироста энергетических характеристик результирующего сигнала АЭ и показана их информативность.

### Результаты исследований

При трении и износе материалов, включая и КМ, как известно [12], происходит постепенное изменение условий трения, обусловленное изменением механизмов процессов, развивающихся в поверхностных слоях фрикционного контакта. В общем случае, при трении выделяют несколько основных стадий износа, такие как: стадия стабильного износа, стадия перехода к катастрофическому износу, стадия катастрофического износа. Можно также выделить и последнюю не продолжительную стадию – стадию непрерывного катастрофического износа или непрерывного катастрофического разрушения поверхностей фрикционного контакта, которая, как показывают исследования, хорошо фиксируется при регистрации акустического излучения. Безусловно, что переход от стадии к стадии сопровождается изменением условий трения и скоростью протекания процесса разрушения элементов КМ, которые связаны с изменением напряженно-деформированного состояния поверхностей узла трения и площадью фрикционного контакта. Данные условия мы будем учитывать при моделировании энергии акустического излучения или результирующего сигнала АЭ.

При моделировании энергии акустического излучения будем рассматривать каждую стадию развивающегося процесса отдельно, с учетом изменения начальных условий возникновения разрушения при переходе от стадии к стадии. Это обусловлено тем, что при проведении расчетов необходимо проводить определение граничного напряжения разрушения, которое связано со временем  $t_0$  начала разрушения элементов КМ в первой площадке фрикционного контакта, согласно (2). Поэтому при рассмотрении каждой стадии отдельно будем условно считать, что начальное время  $t_0$  разрушения элементов КМ на каждой последующей стадии начитается при некотором граничном напряжении  $\sigma_0$ , которое соответствует постоянному времени начала разрушения  $t_0$ , т.е.  $t_0 = \text{const}$ . При построении общего результирующего сигнала АЭ будем проводить объединении результирующих сигналов на отдельных стадиях. При этом время в каждой точке перехода от стадии к стадии будет являться текущим временем протекания процесса разрушения элементов КМ.

При моделировании результирующих сигналов АЭ на рассматриваемых стадиях примем определенные начальные условия. К данным условиям будем относить:  $\alpha$  – скорость разрушения элементов КМ;  $P$  – осевую нагрузку;  $t_0$  – время начала разрушения первой площадки контактного взаимодействия;  $\sigma_0$  – граничное напряжение начала разрушения элементов КМ;  $S$  – размер площадки контактного взаимодействия. При этом физико-механические характеристики КМ, характеризующиеся параметрами  $r$  и  $v_0$ , а так же геометрические размеры элементов КМ, характеризующиеся параметром  $g$ , будут неизменными. Расчеты энергии акустического излучения проведем в относительных единицах при условии, что все параметры, входящие в (1), (2) и (3), приведены к безразмерным величинам.

Значения параметров для каждой стадии моделирования результирующего сигнала АЭ приведены в табл.1.

Таблица 1.

Начальные условия для проведения расчетов энергии акустического излучения на стадиях трения и износа

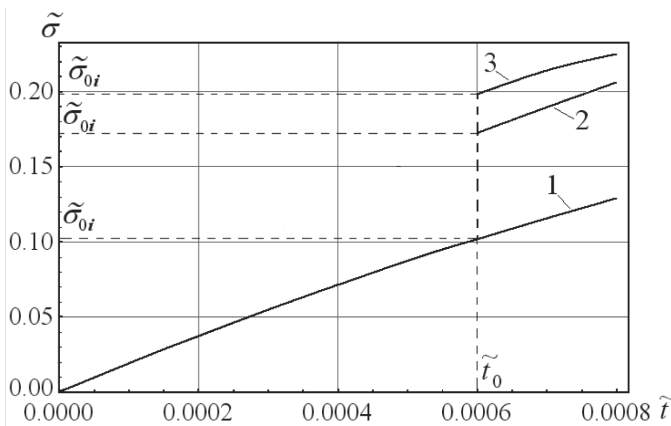
№ п/п	Стадия разрушения поверхности фрикционного контакта	$\tilde{\alpha}$	$\tilde{P}$	$\tilde{S}$	$\tilde{t}_0$
1	Стадия разрушения поверхности фрикционного контакта	200	1	1	0,0006
2	Переход к катастрофическому разрушению	200...400	1...2	1	0,0006
3	Катастрофическое разрушение	400...500	2...2,5	1...1,5	0,0006
4	Стабильное катастрофическое разрушение	500	2,5	1,5...1,7	0,0006

Увеличение  $\tilde{\alpha}$  на 2 и 3 стадиях связано с возрастанием  $\tilde{P}$ . Это обусловлено тем, что возрастание  $\tilde{P}$  приводит к изменению напряженно-деформированного состояния, которое приводит к увеличению граничного напряжения разрушения  $\tilde{\sigma}_0$ , и, как следствие, к увеличению мгновенной скорости разрушения  $\tilde{\alpha}$ , по отношению к ее начальному значению [9]. Для заданных условий (табл. 1), определение граничных напряжений разрушения проведем по выражению

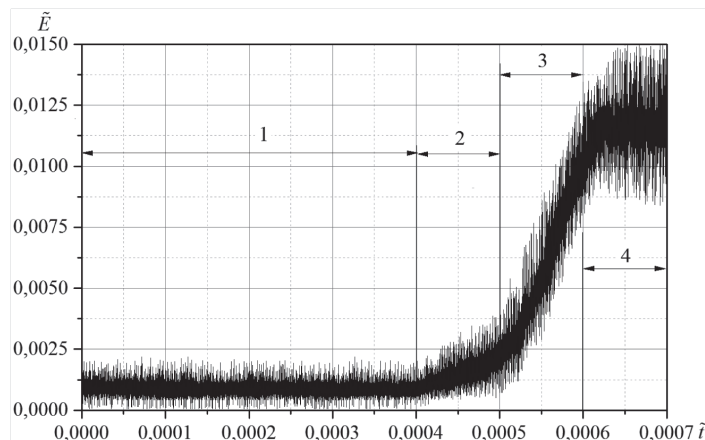
$$\tilde{\alpha} = \tilde{\alpha} \tilde{t} (1 - \tilde{\alpha} \tilde{t}) (1 - \tilde{g} \sqrt{\tilde{\alpha} \tilde{t}}), \quad (4)$$

при  $t = t_0$ .

Для проведения моделирования энергии акустического излучения и граничных напряжений разрушения значения параметров  $v_0$ ,  $g$  и  $r$ , примем равными:  $\tilde{v}_0 = 10^6$ ;  $\tilde{g} = 0,1$ ;  $\tilde{r} = 10^4$ .



**Рис. 1.** Графики изменения эквивалентных напряжений для принятых условий разрушения КМ: 1 –  $\tilde{\alpha} = 200$ ; 2 –  $\tilde{\alpha} = 400$ ; 3 –  $\tilde{\alpha} = 500$ .  $\tilde{t}_0$  – время начала разрушения элементов КМ,  $\tilde{\sigma}_{0i}$  – граничное напряжение разрушения для заданного значения  $\tilde{\alpha}$ ;  $i$  – индекс скорости разрушения



**Рис. 2.** График зависимости энергии результирующего сигнала АЭ во времени в относительных единицах при трении поверхности из КМ: 1 – стадия нормального износа; 2 – стадия, которая предшествует катастрофическому разрушению поверхностей; 3 – стадия катастрофического разрушения поверхностей; 4 – стадия стабильного катастрофического разрушения

На рис. 1 показаны зависимости изменения эквивалентных напряжений для определения граничных напряжений, согласно принятым условиям (табл. 1). Из результатов проведенных расчетов определено, что значения граничных напряжений разрушения составляют: для стадии 1 при  $\tilde{\alpha}_0 = 200 - \tilde{\sigma}_0 = 0,10194191$ ; для стадии 2 при  $\tilde{\alpha}_0 = 400 - \tilde{\sigma}_0 = 0,173464261$ ; для стадии 3 при  $\tilde{\alpha}_0 = 500 - \tilde{\sigma}_0 = 0,198498$ .

Как и в работах [9, 14], при моделировании акустического излучения будем считать, что разрушение контактных площадок из КМ происходит последовательным образом. При таком условии, интервал времени  $\Delta t_j$  между разрушением предыдущей и последующей площадками является постоянной величиной. При увеличении  $\tilde{\alpha}$  данный интервал времени будем уменьшать пропорционально уменьшению длительности импульсных сигналов, относительно их длительности при  $\tilde{\alpha} = 200$ . Исходя из длительности сигнала АЭ при  $\tilde{\alpha} = 200$ , значение интервала  $\Delta t_j$  примем равным  $\Delta t_j = 1,1 \cdot 10^{-6}$ . При этом случайную составляющую времени  $\delta$  появления импульсных сигналов АЭ при  $\tilde{\alpha} = 200$  будем изменять в диапазоне величин  $\tilde{\delta} = 0, \dots, 5,0 \cdot 10^{-7}$  случайным образом. С увеличением  $\tilde{\alpha}$  величину  $\tilde{\delta}$  также будем уменьшать пропорционально уменьшению длительности импульсных сигналов АЭ. Также будем считать, что возрастание параметров  $\tilde{P}$  и  $\tilde{S}$  происходит по линейным законам.

Результат объединенного моделирования акустического излучения в виде графика изменения энергии результирующего сигнала АЭ на всех принятых стадиях разрушения поверхностных слоев КМ во времени в относительных единицах показан на рис. 2. При построении графика рис. 2 на стадии 1 проводилось моделирование 4000 импульсных сигналов АЭ, а на стадиях 2, 3, и 4 – по 1000 импульсных сигналов АЭ. При объединении результатов моделирования результирующих сигналов АЭ на отдельных стадиях в единый график текущее время представлено в виде  $(\tilde{t} - \tilde{t}_0)$ .

Из полученных результатов видно, что на стадии нормального износа и стадии стабильного катастрофического разрушения (стадии 1 и 4, рис. 2) результирующий сигнал АЭ можно характеризовать некоторым средним уровнем энергии и величиной его разброса. На стадиях 2 и 3 (рис. 2), т.е. переходной стадии и стадии катастрофического разрушения, наблюдается как возрастание среднего уровня энергии, так и величины ее разброса.

С точки зрения информативности параметров результирующего сигнала АЭ, формируемого при трении и износе поверхностей из КМ,

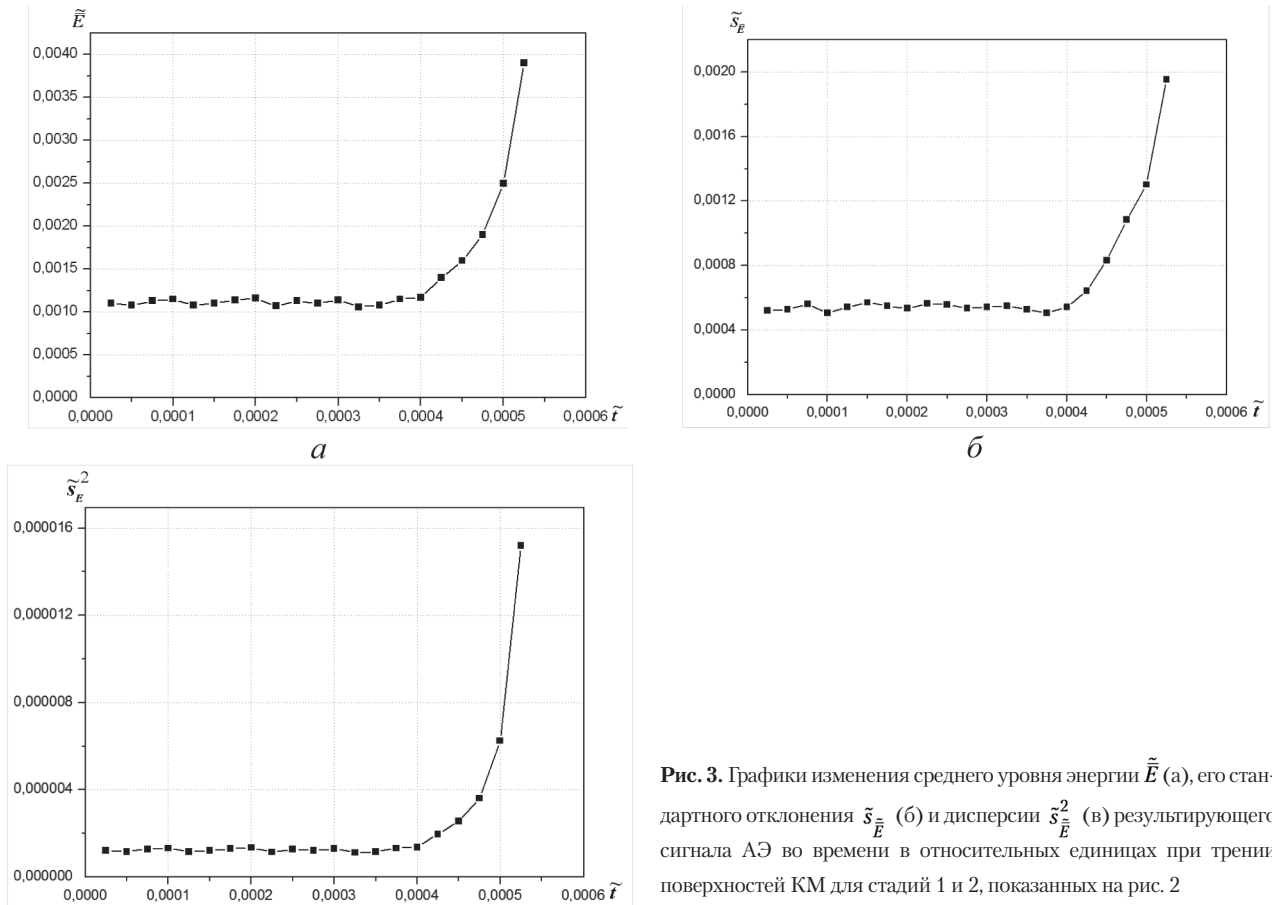


Рис. 3. Графики изменения среднего уровня энергии  $\tilde{E}$  (а), его стандартного отклонения  $\tilde{s}_E$  (б) и дисперсии  $\tilde{s}_E^2$  (в) результирующего сигнала АЭ во времени в относительных единицах при трении поверхностей КМ для стадий 1 и 2, показанных на рис. 2

наибольший интерес представляет переходная стадия (стадия 2, рис. 2), которая предшествует стадии катастрофического разрушения. Обнаружение такой стадии является важным при разработке методов контроля и диагностики узлов трения из КМ. Поэтому проведем расчеты статистических характеристик энергии результирующего сигнала АЭ на стадиях 1 и 2 (рис. 2). Расчеты будем проводить при равномерной разбивке длин реализации стадий 1 и 2 на выборки, длина которых будет составлять 250 расчетных точек энергии результирующих сигналов АЭ. Для каждой выборки будем определять средней уровень энергии  $\tilde{E}$ , его стандартное отклонение и дисперсию  $\tilde{s}_E$ . Результаты проведенных расчетов в виде зависимостей изменения  $\tilde{E}$ ,  $\tilde{s}_E$  и  $\tilde{s}_E^2$  во времени в относительных единицах для стадий 1 и 2 показаны на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что полученные зависимости можно разбить на две части. Первая, относится к стадии нормального износа (стадия 1, рис. 2). Вторая, относится к стадии, предшествующей катастрофическому разрушению (стадия 2, рис. 2). Как

показывает обработка полученных данных, на стадии 1 зависимости  $\tilde{E}$ ,  $\tilde{s}_E$  и  $\tilde{s}_E^2$  хорошо описываются линейной функцией вида

$$Q_E = a + b\tilde{t}, \quad (5)$$

где  $Q_E$  – исследуемый энергетический параметр результирующего сигнала АЭ (средней уровень энергии  $\tilde{E}$ , его стандартное отклонение  $\tilde{s}_E$  или дисперсия  $\tilde{s}_E^2$ ;  $a$  и  $b$  – коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Расчеты показывают, что значения коэффициентов  $a$  и  $b$  составляют: для  $\tilde{E}$  –  $a=0,0011$ ,  $b=0,05294$ ; для  $\tilde{s}_E$  –  $a=0,00068$ ,  $b=0,0019$ ; для  $\tilde{s}_E^2$  –  $a=0,00000122$ ,  $b=0,000122$ . При этом коэффициент корреляции  $R$  составляет: для  $\tilde{E}$  –  $R=0,91768$ ; для  $\tilde{s}_E$  –  $R=0,93542$ ; для  $\tilde{s}_E^2$  –  $R=0,91282$ .

На стадии 2 зависимости  $\tilde{E}$ ,  $\tilde{s}_E$  и  $\tilde{s}_E^2$  хорошо описываются линейной функцией вида

$$Q'_E = A\tilde{t}^B, \quad (6)$$

где  $Q'_E$  - исследуемый энергетический параметр результирующего сигнала АЭ (средней уровень энергии  $\bar{\tilde{E}}$ , его стандартное отклонение  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}$  или дисперсия  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}^2$ ;  $A$  и  $B$  - коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Расчеты показывают, что значения коэффициентов  $A$  и  $B$  составляют: для  $\bar{\tilde{E}}$  -  $A = 1,53$ ,  $B = 1,25$ ; для  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}$  -  $A = 1,48$ ,  $B = 2,34$ ; для  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}^2$  -  $A = 1,72$ ,  $B = 6,78$ . При этом коэффициент детерминации  $R^2$  составляет: для  $\bar{\tilde{E}}$  -  $R^2 = 0,92908$ ; для  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}$  -  $R^2 = 0,94251$ ; для  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}^2$  -  $R^2 = 0,90968$ .

Из полученных данных видно, что на первой стадии практически не наблюдается возрастания энергетических параметров результирующего сигнала АЭ ( $\bar{\tilde{E}}$ ,  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}$  и  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}^2$ ). На второй стадии, т.е. стадии, предшествующей катастрофическому разрушению, или переходной стадии, происходит возрастание энергетических параметров результирующего сигнала АЭ, что хорошо наблюдается на зависимостях процентного прироста параметров анализируемых сигналов. Такой процентный прирост значений, и, по отношению к их величинам для первой выборки сигнала на стадии нормального изнашивания, т.е. при  $\tilde{t} = 0,000025$ , показан на зависимостях, приведенных на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что возрастание процентного прироста среднего уровня энергии  $\bar{\tilde{E}}$ , его стандартного отклонения  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}$  и дисперсии  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}^2$  наблюдается не на стадии нормального износа, а на переходной стадии, предшествующей стадии катастрофического износа. При этом процентный прирост  $\bar{\tilde{E}}$  и  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}$  практически совпадают между собой. В тоже время, наибольший процентный прирост наблюдается в дисперсии среднего уровня результирующего сигнала АЭ. Как показывает обработка полученных данных, в точке окончания стадии 2 (рис. 2), согласно принятым условиям моделирования, т.е. в точке  $C$  (рис. 4), процентный прирост дисперсии среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ превышает процентный прирост среднего уровня энергии и процентный прирост его стандартного отклонения более, чем в 2,8 раза. В точке перехода к стадии катастрофического разрушения поверх-

ностных слоев из КМ (точка D, рис. 4) данное превышение уже составляет более, чем 4,5 раза.

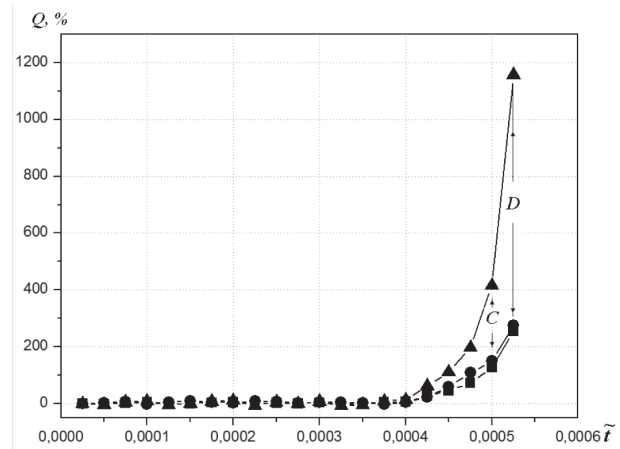


Рис. 4. Графики процентного прироста среднего уровня энергии  $\bar{\tilde{E}}$  (■), его стандартного отклонения  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}$  (●) и дисперсии  $\tilde{\sigma}_{\tilde{E}}^2$  (▲) результирующего сигнала АЭ во времени в относительных единицах при трении поверхностей КМ для стадий 1 и 2, показанных на рис. 2

Результаты проведенных исследований показывают, что при работе узла трения из КМ в процессе развития разрушения поверхностных слоев должно наблюдаться изменение в характере и параметрах акустического излучения. При этом стадия нормального износа характеризуется стабильностью излучения с отсутствием значительного прироста параметров результирующего сигнала АЭ. В тоже время, возникновение начальных стадий перехода к катастрофическому разрушению, т.е. переход к следующему уровню развития процесса разрушения поверхностных слоев, должен приводить к возрастанию энергетических параметров акустического излучения. При этом наибольший прирост следует ожидать в дисперсии среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ. Наличие такого возрастания параметров акустического излучения может использоваться для фиксации перехода узла трения к стадии катастрофического разрушения.

### Выводы

Результаты проведенных исследований показывают, что при трении и износе поверхностей из КМ результирующий сигнал АЭ представляет собой непрерывный сигнал. На стадии нормального износа наблюдается стабильное излучение, характеризующееся некоторым средним уровнем энергии, а так



же величиной его дисперсии и стандартного отклонения. На данной стадии не наблюдается прироста анализируемых параметров результирующего сигнала АЭ.

В дальнейшем, при последовательном переходе на промежуточную стадию, которая предшествует стадии катастрофического износа, и на стадию катастрофического износа происходит возрастание энергетических параметров результирующего сигнала АЭ – среднего уровня энергии, его стандартного отклонения и дисперсии. Возрастание данных параметров происходит по нелинейным законам. Анализ полученных данных показывает, что возникновение начальных стадий перехода к катастрофическому разрушению приводит к возрастанию энергетических параметров акустического излучения. При этом процентный прирост среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ и его стандартного отклонения практически совпадают. Наибольший прирост наблюдается в дисперсии среднего уровня энергии результирующего сигнала АЭ. Из результатов проведенного исследования следует, что такое возрастания параметров акустического излучения может быть использовано для контроля узлов трения из КМ с фиксацией его перехода на стадию, предшествующую стадии катастрофического разрушения. В тоже время, интерес представляет проведение экспериментальных исследований узлов трения из КМ с анализом закономерностей изменения энергии акустического излучения на всех стадиях трения и износа.

### Литература

- [1] Mechefske C. K. Using acoustic emission to monitor sliding wear /C. K. Mechefske, G. Sun, J. Sheasby// *Insight*. – 2002. – V. 44. – No 8. – P. 1–8.
- [2] Benabdallah H. S. Acoustic Emission and its relationship with friction and wear for sliding contact / H. S. Benabdallah, D. A. Aguilar // *Tribology Transactions*. – 2008. – Vol. 51. – P. 738–747.
- [3] Hase A. Acoustic emission in elementary processes of friction an wear: In-situ observation of friction surface and AT signals/ A. Hase, M. Wada, H. Mishina// *J. of advanced mechanical desing, items and manufacturing*. – 2009. – v. 3. – No 4. – P. 333–344.
- [4] Fan Y. Modeling acoustic emissions generated by sliding friction/Y. Tools Fan, F. Gu, A. Ball // *Wear*. – 2010. – v. 268 (5–6). – P. 811–815.
- [5] Filonenko S. F. Non-equilibrium self-organization Steel – bronze tribosystem on the basis of the acoustic emission method application / S. F. Filonenko, V. N. Stadnichenko // *Aviation*. – 2010. – v. 14. – No 3. – P. 71–76

- [6] Filonenko S. F. Modelling of acoustic emission signals at friction of materials' surface layers / S. F. Filonenko, V. M. Stadnycenko, A. P. Stahova // *Aviation*. – 2008. – v. 12. – No 3. – P. 87–94.
- [7] Філоненко С. Ф. Модель сигналу аустичної емісії при терті поверхонь композиційних матеріалів / С. Ф. Філоненко, Т. М. Косицка, О. П. Космач // *Нукоемні технології*. – 2010. – № 6. – С. 79–86.
- [8] Filonenko S. F. Influence of friction surfaces properties of composite materials on acoustic emission/ S. F. Filonenko, O. P. Kosmach // *Proceedings of the NAU*. – 2013. – No 1 – P. 70–77.
- [9] Філоненко С. Ф. Закономірності зміни акустичного випромінювання при зростанні навантаження на пару тертя з композиційного матеріалу/ С. Ф. Філоненко, Т. М. Косицка, О. П. Космач // *Вісник НАУ*. – 2013. – № 2. – С. 79–89
- [10] Филоненко С. Ф. Влияние размеров элементов композиционного материала на параметры акустической эмиссии при трении / С. Ф. Филоненко, Т. Н. Косицкая, А. П. Космач // *Вісник інженерної академії України*. – 2013. – № 1. – С. 151–158
- [11] Filonenko S. Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation/ Filonenko S., Kalita, V., Kosmach O.// *Aviation*. – 2012. – V. 16, No 1. – P. 5–13.
- [12] Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ [И. В. Крагельский М. Н. Добычин, В. С. Комбалов ]. – М.: Машиностроение. – 1977. – 526 с.
- [13] Беркович И. И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для Вузов [И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский]. – Самара: Изд. Самарского гос. техн. ун-т., 2000. – 268 с.

Filonenko S.F., Kositskaya T.N., Nimchenko T.V.

National Aviation University. Ukraine, Kiev

## ENERGY OF ACOUSTIC RADIATION AT FRICTION OF SURFACES FROM COMPOSITE MATERIALS

*In the article the simulation of acoustic radiation energy during the process of friction and wearing of surfaces from a composite material are reviewed. It is shown, that at the stage of normal wear is not watched the increment of energy parameters of acoustic emission resultant signal. It is determined, that with transition to stage, which one will precede stages of disastrous wearing, there is ascending energy parameters of acoustic radiation. It is shown, that the greatest increment is watched in the dispersion of average energy level of acoustic emission resultant signal.*

*Keywords:* energy of acoustic emission; composite material; acoustic radiation; friction pair.

### References

- [1] Mechefske C.K. Using acoustic emission to monitor sliding wear /C.K. Mechefske, G. Sun, J. Sheasby// Insight. – 2002. – V. 44. – No 8. – P. 1–8.
- [2] Benabdallah H.S. Acoustic Emission and its relationship with friction and wear for sliding contact / H. S. Benabdallah, D. A. Aguilar // Tribology Transactions. – 2008. – Vol.51. – P. 738–747.
- [3] Hase A. Acoustic emission in elementary processes of friction an wear: In-situ observation of friction surface and AT signals/ A. Hase, M. Wada, H. Mishina// J. of advanced mechanical desing, items and manufacturing. – 2009. – V.3. – No 4. – P. 333–344.
- [4] Fan Y. Modeling acoustic emissions generated by sliding friction / Y. Tools Fan, F.Gu, A.Ball // Wear. – 2010. – V. 268 (5–6). – P. 811–815.
- [5] Filonenko S.F. Non-equilibrium self-organization Steel – bronze tribosystem on the basis of the acoustic emission method application /S.F.Filonenko, V.N.Stadnichenko //Aviation. – 2010. – V. 14. – No3. – P. 71–76.
- [6] Filonenko S.F. Modeling of acoustic emission signals at friction of materials' surface layers/S.F. Filonenko, V.M. Stadnychenko, A.P. Stahova //Aviation. – 2008. – V. 12. – No3. – P. 87–94.
- [7] Filonenko S.F. Model signalu akustichnoji emisii pri terti poverkhon kompozicijnikh materialiv /S.F. Filonenko, T.M. Kosicka, O.P. Kosmach // Naukojemni tehnologiji. – 2010. – № 6. – S. 79–86. (Ukrainian)
- [8] Filonenko S.F. Influence of friction surfaces properties of composite materials on acoustic emission/ S.F. Filonenko, O.P. Kosmach // Proceedings of the NAU. – 2013. – No1 – P. 70–77.
- [9] Filonenko S.F. Zakonomirnosti zmini akustichnogo viprominjuvannja pri zrostanni navantzhennja na paru tertja z kompozicijnogo materialu / S.F. Filonenko, T.M. Kosicka, O.P. Kosmach // Visnik NAU. – 2013. – №2. – S. 79–89. (Ukrainian)
- [10] Filonenko S.F. Vlijanie razmerov elementov kompozicionnogo materiala na parametry akusticheskoi emissii pri trenii / S.F. Filonenko, T.N. Kositskaja, A.P. Kosmach // Visnik inzhenernoji akademiji Ukrainy. – 2013. – №1. – S. 151–158. (Russian)
- [11] Filonenko S. Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation/ Filonenko S., Kalita V., Kosmach O.// Aviation. – 2012. – V. 16, N 1, – P. 5–13.
- [12] Kragelskiy I.V. Osnovy raschetov na trenie i iznos //I.V. Kragelskiy, M.N. Dobychin, V.S. Kombalov. – M.: Mashinostroenie. – 1977. – 526 s. (Russian)
- [13] Berkovich I.I. Tribologija. Fizicheskie osnovy, mehanika i tehniceskije prilozhenija: Uchebnik dlja Vuzov // I.I. Berkovich, D.G. Gromakovskij. – Samara: Izd.Samarskogo gos. tehn. un-t., 2000. – 268 s. (Russian)